

EFFECTO DEL CAMBIO DE REFRIGERANTE EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE HIELO LÍQUIDO CON GENERADOR DE TIPO RASCADOR

DIZ MONTERO, Rubén; FERNÁNDEZ SEARA, José; ÁLVAREZ PARDIÑAS, Ángel,

FERNÁNDEZ CID; Diego

jseara@uvigo.es

Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial, Área de Máquinas y Motores Térmicos

RESUMEN

El hielo líquido es un fluido secundario con un elevado potencial debido a su alta densidad de energía gracias al aprovechamiento del calor latente de cambio de fase de microcristales de hielo en una disolución acuosa, lo que permite su bombeo sin necesidad de equipos especiales. Hasta día de hoy, se han planteado muy distintos sistemas de generación de hielo líquido, de los cuales los generadores de superficie rascada son los que mayor nivel de implantación comercial han alcanzado. Por otra parte, las reglamentaciones existentes en referencia al uso de los refrigerantes halogenados hacen que sea necesario dar solución a aquellos sistemas que originalmente empleaban refrigerantes de tipo CFCs y HCFCs.

En este trabajo, se analiza experimentalmente el efecto de la sustitución directa de R22 por R417A en un equipo de generación de hielo líquido con generador de superficie rascada. En el artículo, se describe el equipo experimental utilizado, se detalla la metodología experimental seguida y se presentan y analizan los principales resultados obtenidos.

Palabras clave: Hielo líquido, generador de superficie rascada, cambio de refrigerante

1. Introducción

El hielo líquido consiste en una suspensión de microcristales de hielo en una disolución acuosa cuya principal ventaja, frente a otros fluidos empleados tradicionalmente como fluidos secundarios, reside en el aprovechamiento del calor latente de cambio de fase de los microcristales, lo que le confiere una mayor capacidad de enfriamiento por unidad de volumen. Esta ventaja permite reducir la cantidad de fluido necesaria para satisfacer una determinada carga térmica, o incrementar la capacidad de enfriamiento para una misma cantidad de fluido en comparación con los fluidos monofásicos utilizados tradicionalmente. Además, la mayor densidad de energía permite el almacenamiento de una gran cantidad de energía en relativamente poco volumen, haciendo viable la independización de la demanda térmica de su producción, evitando el sobredimensionado de equipos y permitiendo el aprovechamiento de periodos de menor coste energético para su producción. Por último, el hielo líquido presenta otras ventajas particulares, dependiendo de la aplicación, que hace que se postule como una opción interesante en numerosas aplicaciones.

En la actualidad existen diferentes sistemas para la producción de hielo líquido con distintos niveles de implementación, siendo los sistemas con generador de tipo rascador los que un mayor nivel de desarrollo han alcanzado en los últimos 25 años [1]. El sistema de generación más habitual consiste en dos cilindros coaxiales de forma que un refrigerante primario recorre el espacio anular y una disolución con anticongelante circula a través del cilindro interior. Según este diseño, el refrigerante a baja temperatura absorbe calor a través de la pared del cilindro interior provocando la congelación de la disolución en la zona de contacto con la pared. Para evitar la formación de una capa continua de hielo, estos sistemas disponen de un sistema de rascado, consistente en la mayoría de los casos en un tambor giratorio concéntrico con los cilindros, y con cuchillas situadas sobre su superficie exterior.

Uno de los refrigerantes más empleados en estos generadores de hielo líquido, por sus buenas propiedades termodinámicas para aplicaciones a media y baja temperatura, es el R22, si bien, las normativas existentes referidas al uso de refrigerantes halogenados hacen imprescindible la búsqueda de nuevas soluciones. Una de las líneas de investigación pasa por la búsqueda de sustitutos directos de este refrigerante que no necesiten de modificaciones sustanciales en los equipos, de modo que sean compatibles con los materiales utilizados, tipos de juntas, aceites, etc...

Diferentes investigaciones han evaluado la sustitución del R22 en diferentes tipos de sistemas. En Aprea y Renno (2004) [2] reducciones del COP en torno al 15% con la sustitución del R22 por R417A en una planta de refrigeración fueron observadas. Rocca y Panno (2011) [3] también describen una reducción importante al sustituir R22 por R417A, que hacen extensible a la sustitución por otras alternativas como R422A o R422D.

Teniendo esto en cuenta, en este trabajo se presenta el efecto de la sustitución directa del refrigerante R22 por R417A en un equipo de generación de hielo líquido con generador de superficie rascada. En el artículo se describe el equipo experimental utilizado, el procedimiento experimental seguido y se presentan los principales resultados obtenidos.

2. Equipo experimental

Para este trabajo se ha analizado se ha dispuesto de una máquina frigorífica destinada a la producción de hielo líquido facilitada por KINARCA S.A.u., la cual trabaja según un ciclo de compresión de vapor de simple etapa la cual fue diseñada para trabajar con R22 como refrigerante. La principal diferencia entre esta máquina y una instalación típica de compresión de vapor de simple etapa es la sustitución del evaporador por el generador del hielo líquido. El generador de hielo líquido está formado por un tubo vertical rodeado de una carcasa de modo que el refrigerante circula por el espacio entre el tubo y la carcasa, mientras que sobre las paredes interiores del tubo tiene lugar la formación de los cristales de hielo. Un elemento fundamental en este tipo de sistemas es el rascador, que es el encargado de separar los cristales de hielo formados sobre las paredes del tubo para que sean arrastrados por el caudal de fluido secundario. Los demás componentes principales de la instalación son un compresor alternativo semihermético, un condensador de doble tubo con forma helicoidal, un

intercambiador de doble tubo líquido-vapor y una válvula de expansión termostática. Además, la instalación se completa con otros elementos complementarios como el separador de aceite, depósito de líquido, filtros, visores, antirretornos, solenoides, etc...

En la Figura 1 se muestra un esquema de la instalación experimental.

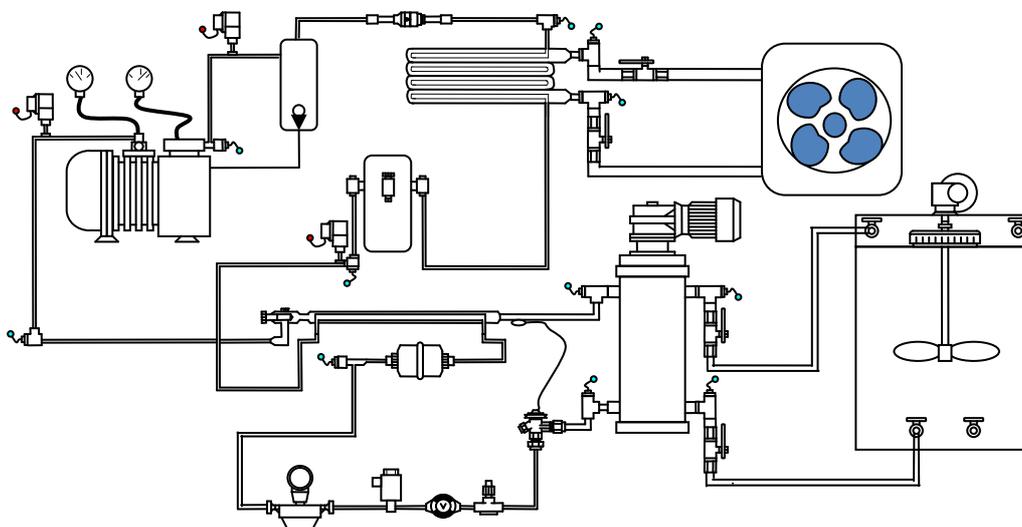


Figura 1: Esquema de la instalación experimental.

El hielo líquido es producido a partir de una disolución de agua y anticongelante procedente de un tanque de acumulación de 500 litros de capacidad dotado de un sistema de agitación para homogeneizar el contenido y mantener los cristales de hielo en suspensión. La disolución es aspirada desde el tanque con una bomba centrífuga comercial y enviada al generador de hielo líquido en donde entra por la toma inferior y sale por la superior para retornar al depósito. Este procedimiento se realiza de forma continua de modo que se va incrementando progresivamente la cantidad de hielo presente en el tanque. Respecto a la disolución indicar que las disoluciones empleadas para la generación de hielo líquido fueron etilenglicol al 10% en los ensayos con R22 y propilenglicol al 10% en los ensayos con R417A, si bien los cálculos realizados con un programa de simulación desarrollado en el laboratorio mostraron que el efecto del cambio de fluido es muy reducido.

Para retirar el calor necesario para la condensación del refrigerante se empleó un circuito cerrado con agua, el cual fue dotado de los elementos de disipación necesarios para ceder al ambiente el calor absorbido en el condensador.

Para poder llevar a cabo este estudio se instrumentalizó la instalación con los elementos de medida necesarios, de forma que se pudo recoger mediante una tarjeta de adquisición de datos en un ordenador los parámetros de funcionamiento necesarios. El sistema de adquisición de datos original empleado en los ensayos con R22 se describe en detalle en [4], y se compone de sensores de temperatura y presión en el circuito frigorífico, sensores de temperatura en las entradas y salidas del hielo líquido en el generador y del medio condensante en el condensador, caudalímetros en los circuitos de hielo líquido y medio condensante, y un analizador de redes para la medida de los parámetros eléctricos. En el caso del hielo líquido se utilizaron dos caudalímetros másicos para poder determinar tanto el caudal como la densidad del hielo líquido, necesaria esta segunda para la obtención del porcentaje de hielo.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en estos primeros ensayos y las limitaciones observadas se realizaron varias modificaciones en el sistema de adquisición de datos aprovechando el cambio de refrigerante. De este modo, se introdujo un caudalímetro másico Micro Motion F025s asociado a un transmisor Micro Motion Transmitter 2700 en la línea de líquido para conocer de forma directa el caudal de refrigerante y evitar la obtención indirecta de dicho valor. Además, se instalaron dos sensores adicionales de presión MBS 5150 fabricados por Danfoss para un rango de medida entre 0 y 16 bares en la aspiración y descarga del compresor.

3. Procedimiento experimental y tratamiento de datos

3.1. Procedimiento experimental

Los resultados mostrados en este trabajo se corresponden a los datos obtenidos durante procesos de generación de hielo líquido en el tanque de acumulación partiendo, en todos los casos, de una disolución a una temperatura suficientemente alejada de la temperatura de congelación para garantizar la fusión total de los cristales de los ensayos anteriores, y finalizando cuando se alcanza una concentración de hielo a la salida del generador del 20%.

Las condiciones de funcionamiento controladas durante los ensayos fueron el caudal inicial de disolución, la presión de condensación del ciclo frigorífico y el grado de recalentamiento a la salida del generador. Como condiciones de referencia se fijaron un caudal de disolución (hielo líquido) de 1100 kg/h, una presión de condensación de 12 bar y un grado de recalentamiento de 2 °C, realizándose los ensayos variando alguna de las condiciones de funcionamiento y manteniendo el resto en las condiciones de referencia. Respecto al caudal de hielo líquido este depende del porcentaje de hielo por lo que los valores seleccionados para los ensayos se corresponden al inicio de los mismos.

En la Tabla 1 se recoge un resumen de las condiciones ensayadas.

Tabla 2: Condiciones de los ensayos

	Referencia	Rango de ensayos
Caudal disolución hielo líquido)	1100 kg/h	550 -1100 kg/h
Grado de recalentamiento	2 °C	1 -6 °C
Presión de condensación	12 bar	

En base a los datos obtenidos experimentalmente se ha analizado el funcionamiento global de la máquina frigorífica así como de cada uno de los componentes en particular, poniendo especial atención en el análisis del generador de hielo líquido.

3.2. Tratamiento de datos

Uno de los principales retos cuando se trabaja con hielo líquido es la determinación del porcentaje de hielo existente. En este trabajo se han considerado dos métodos de determinación diferentes, como son a partir de la medición de la densidad y de la temperatura del hielo líquido.

El método de obtención a partir de las medidas de temperatura se basa en las hipótesis de que los cristales de hielo están formados por agua pura y que la disolución se encuentra en todo momento a la temperatura de cambio de fase. El método de obtención a partir de la medición de la densidad se basa en que la densidad de hielo líquido (ρ_{hl}) se puede obtener a partir de las densidades del hielo puro (ρ_h) y la disolución acuosa (ρ_{fl}) y la cantidad de hielo, de modo que la concentración de hielo (ϕ) se puede obtener mediante la ecuación 1.

$$\phi = \frac{\rho_h (\rho_{fl} - \rho_{hl})}{\rho_{hl} (\rho_{fl} - \rho_h)} \quad (1)$$

Las propiedades del agua de condensación y de los refrigerantes primarios (R22 y R417A) fueron obtenidos mediante REFPROP 8.0 [5], mientras que las propiedades de las disoluciones fueron obtenidas según el método propuesto por Lugo et al. [6] y las propiedades del hielo según Melinder [7].

Para el cálculo de la potencia frigorífica entregada por la instalación se han aplicado balances de energía en el generador de hielo, tanto en el lado del refrigerante como en el lado del hielo líquido. Como ya se ha indicado en los ensayos con R22 se carecía de caudalímetro en el circuito frigorífico,

por lo que el caudal de refrigerante fue obtenido de forma indirecta mediante un balance de energía en el condensador y a partir de la relación de compresión en función de una curva que relaciona la relación de compresión con el rendimiento volumétrico, la cual fue obtenida de un software facilitado por el fabricante del compresor.

Como medida para evaluar la eficiencia de la instalación se ha calculado el EER como el cociente entre la potencia frigorífica obtenida (Q_e) y el consumo eléctrico del compresor, evaluado mediante la potencia aparente (P_{apar}).

$$EER = \frac{Q_e}{P_{apar}} \quad (2)$$

A fin de comparar los resultados obtenidos con ambos refrigerantes y teniendo en cuenta que la duración de los procesos de formación de hielo con ambos refrigerantes son ligeramente diferentes, se ha optado por representar los resultados frente al tiempo relativo (t^*) (Eq. (3)), obtenido como el cociente entre el tiempo transcurrido (t) y el tiempo total (t_{total}) necesario para enfriar la disolución desde 6 °C hasta la temperatura de congelación y producir hielo líquido hasta alcanzar un porcentaje de hielo del 20%.

$$t^* = \frac{t}{t_{total}} \quad (3)$$

4. Resultados

Los resultados mostrados en este trabajo se centran en el análisis comparativo del comportamiento del sistema de generación con ambos refrigerantes, ya que los resultados correspondientes para el análisis paramétrico son similares a los publicados en Diz et al. (2010), por lo que únicamente se comentarán brevemente en este trabajo.

En la Figura 2 se muestran los ciclos de funcionamiento del sistema de generación de hielo líquido con los dos refrigerantes en los ensayos realizados en las condiciones de referencia y con una concentración de hielo en el tanque de acumulación en torno al 10%. En esta Figura se puede observar como la presión de evaporación alcanzada con el R417A es inferior a la obtenida con R22, lo que lleva emparejada una ligera reducción en el efecto refrigerante, y que hay que añadir a la que se produce de por sí por el cambio de refrigerante.

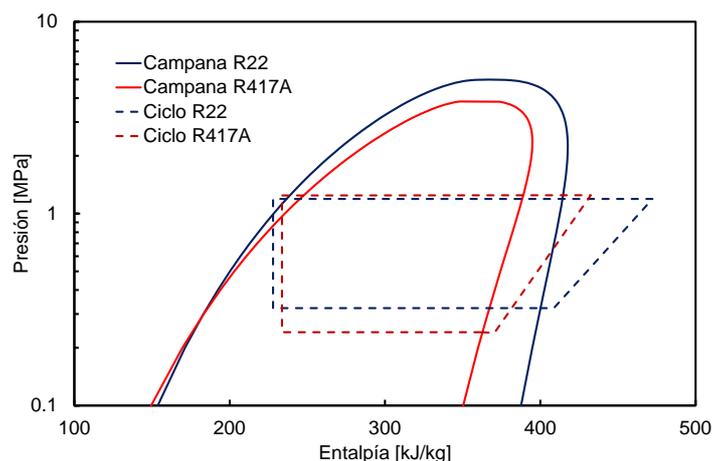


Figura 2: Ciclo de funcionamiento con ambos refrigerantes para las condiciones de referencia y una concentración de hielo del 10%.

Una característica particular de los sistemas con hielo líquido, tal y como se podrá ver a continuación, es que las condiciones de funcionamiento permanecen prácticamente constantes desde que se inicia la

formación de cristales de hielo, por lo que el ciclo de funcionamiento mostrado es representativo de todo el proceso de formación de cristales de hielo.

En cuanto a las temperaturas de descarga del compresor correspondientes a las condiciones mostradas en esta Figura se obtuvieron valores de 100 °C para el R22 y 82 °C con el R417A.

La reducción en la presión debida al cambio de refrigerante se muestra más claramente en la la Figura 3, en la que se representa la evolución de la presión de evaporación en los ensayos realizados con ambos refrigerantes en las condiciones de referencia. En ella se puede apreciar la existencia de una primera zona correspondiente al aporte de calor sensible a la disolución con la consecuente reducción de temperatura, y que provoca una reducción en la presión de evaporación del sistema, y una segunda zona correspondiente al periodo de formación de cristales de hielo en el cual la temperatura de la disolución desciende unicamente en torno a 2 °C y la presión de evaporación permanece practicamente estable. Los valores para los cuales se alcanza esta estabilización son 3,22 bar para el R22 y 2,48 bar para el R417A.

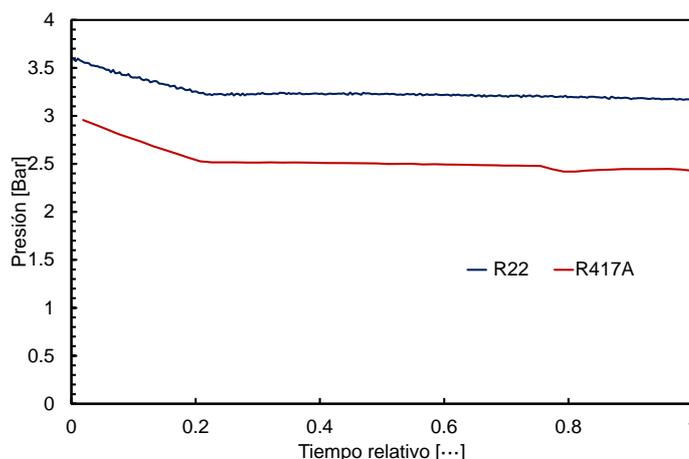


Figura 3: Evolución de la presión de evaporación durante los ensayos en condiciones de referencia.

En la Figura 4 se muestra el caudal de refrigerante que circula por la instalación en los ensayos realizados en las condiciones de referencia con los dos refrigerantes.

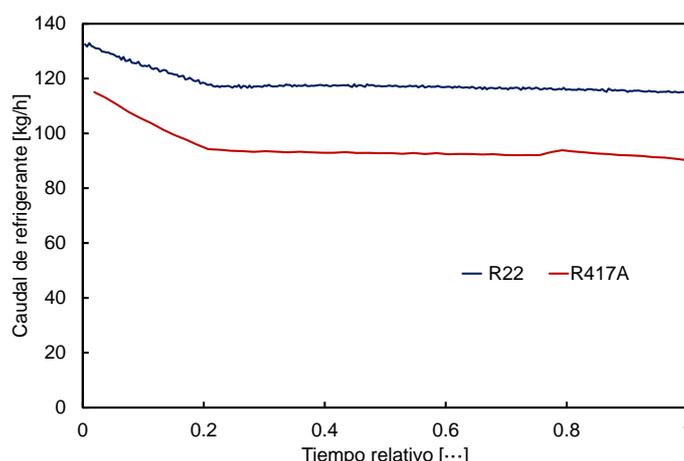


Figura 4: Caudal de refrigerante durante los ensayos en condiciones de referencia.

Los datos mostrados se corresponden, al igual que el caso anterior, al periodo desde que la temperatura de entrada de la disolución en el generador es de 6 °C hasta el final de los ensayos. En esta figura se puede ver nuevamente, la existencia de una primera zona en la que el caudal de refrigerante desciende hasta que comienza la formación de cristales de hielo, instante a partir del cual permanece practicamente constante al no variar apenas el funcionamiento del ciclo frigorífico. Los valores en los que se estabiliza la instalación con ambos refrigerantes fueron 115-118 kg/h para el caso del R22 y 90-93 kg/h para el caso del R417A, lo que supone una reducción de en torno al 21,5%.

Respecto al caudal de refrigerante recordar que los datos mostrados para el R22 se obtuvieron de forma indirecta mediante la aplicación de un balance de energías en el condensador, ante la ausencia de caudalímetro de refrigerante en dichos ensayos.

A continuación se muestra el efecto que estos cambios tienen en los parámetros que mejor definen el comportamiento del sistema frigorífico. De esta forma, se muestra la potencia frigorífica entregada en el generador del sistema de generación y la eficiencia de la instalación evaluada mediante el EER.

En la Figura 5 se muestran los valores de potencia frigorífica producida por el equipo en los ensayos realizados con los dos refrigerantes en condiciones de referencia. Al igual que en casos anteriores se distingue una primera zona en la que desciende la potencia frigorífica obtenida según se va enfriando la disolución y una segunda desde que se inicia la formación de cristales de hielo en la que la potencia permanece prácticamente constante, situándose en torno a 5,3 kW para el R22 y 3,15 kW para el R417A, lo que supone una reducción de potencia de un 40%.

En cuanto al análisis paramétrico la potencia frigorífica aumenta cuanto menor es el grado de recalentamiento y menor es la presión de condensación, mientras que el efecto del caudal de hielo líquido es casi despreciable.

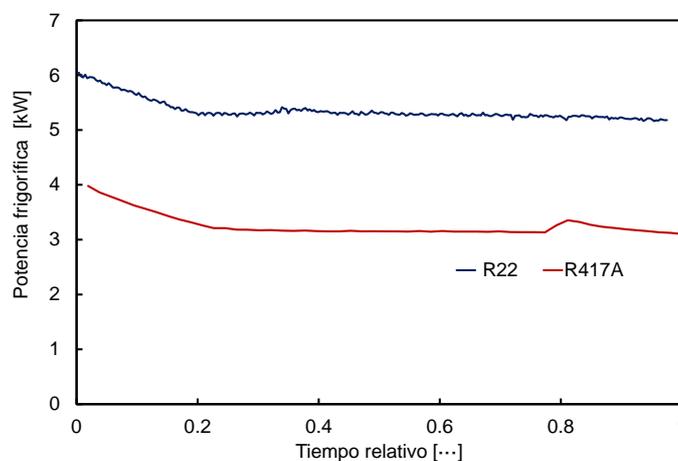


Figura 5: Evolución de la potencia obtenida en los ensayos realizados con los dos refrigerantes en condiciones de referencia.

En la Figura 6 se muestran los valores de eficiencia obtenidos en los ensayos realizados con los dos refrigerantes en condiciones de referencia. Los valores de eficiencia mostrados fueron obtenidos como el cociente entre la potencia frigorífica producida y la potencia aparente consumida por el compresor. En esta Figura se puede ver como el EER desciende hasta que tiene lugar la aparición de los primeros cristales de hielo, instate a partir del cual se mantiene bastante estable con ambos refrigerantes. Los valores de EER obtenidos durante la fase de generación de hielo con R22 se sitúan en torno a 1,7 mientras que para R417A se sitúa en torno a 1,16, es decir, el cambio de refrigerante provoca un descenso en la eficiencia de alrededor del 32%. Como se puede comprobar la reducción en la eficiencia es inferior al de la potencia producida, lo que es debido a que el cambio de refrigerante lleva aparejado una ligera reducción en el consumo del compresor. Esta reducción es similar a la obtenida en las demás condiciones de funcionamiento ensayadas.

En cuanto al análisis paramétrico los resultados obtenidos vuelven a mostrar una mejora con la reducción en el grado de recalentamiento y con la disminución de la presión de condensación, como era de esperar.

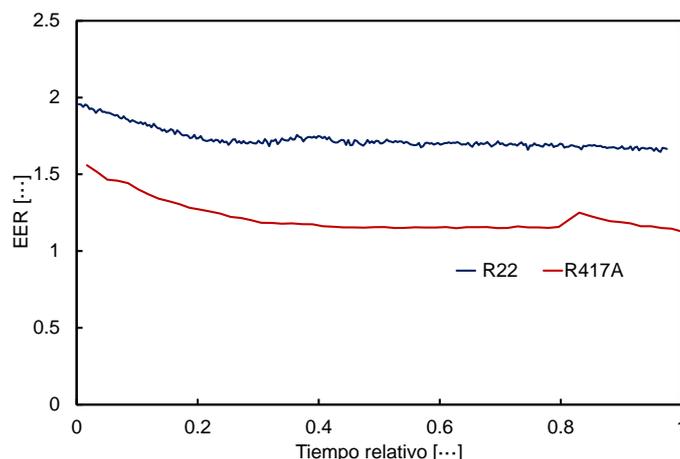


Figura 6: EER en los ensayos realizados con los dos refrigerantes en condiciones de referencia.

5. Conclusiones

Se ha comparado el comportamiento de un sistema de generación de hielo líquido cuando se reemplaza directamente el refrigerante R22 para el cual fue diseñado el equipo por la mezcla R417A. Con ambos refrigerantes se ha observado que las condiciones de funcionamiento desde que se inicia la formación de los cristales hasta el final de los ensayos son prácticamente constantes, lo que puede suponer una ventaja a la hora de optimizar el diseño del sistema de generación.

Los ensayos realizados muestran una importante reducción en las prestaciones del equipo, obteniéndose una reducción en la potencia producida durante el proceso de formación de cristales de hielo próxima al 40% y una pérdida de eficiencia próxima al 32%. Entre las razones que justifican estas reducciones se encuentran la pérdida de efecto refrigerante y la reducción del caudal de refrigerante circulante.

6. Referencias

- [1] STAMATIOU, E., MEEWISE, J.W., KAWAJI, M. *Ice slurry generation involving moving parts*. International Journal of refrigeration, 2005, vol. 28, pp. 60-72.
- [2] APREA C., RENNO C., *Experimental comparison of R22 with R417A performance in a vapour compression refrigeration plant subjected to a cold store*. Energy Conversion and Management, 2004, vol. 45, pp. 1807-1819.
- [3] LA ROCCA V., PANNO V. *Experimental performance evaluation of a vapor compression refrigerating plant when replacing R22 with alternative refrigerants*. Applied Thermal Engineering, 2011, vol. 88, pp. 2809-2815.
- [4] DIZ MONTERO, R., FERNÁNDEZ SEARA, J., UHÍA VIZOSO, F. J., DOPAZO SÁNCHEZ J.A. "Análisis del comportamiento de una máquina frigorífica con generador tubular con rascador para la producción de hielo líquido". En *Actas V Congreso Ibérico y III Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frío (CYTEF2008)*. Castellón.
- [5] LUGO, R., FOURNASION, L., CHOUROT, J.-M., GUILPART, J. *An excess function method to model the thermophysical properties of one-phase secondary refrigerants*. International Journal of Refrigeration, 2002, vol 25, pp. 916-923.
- [6] MELINDER, Å. *Thermophysical Properties of Liquid Secondary Refrigerants, Tables and Diagrams for the Refrigeration Industry*, IIR Handbook, París, 1997.
- [7] LEMMON, E.W., McLINDEN, M.O., HUBER, M.L. *Reference fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP). Version 8.0*, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2008.